Двумерные машины Тьюринга и «тьюрмиты»

А. К. ДЬЮДНИ

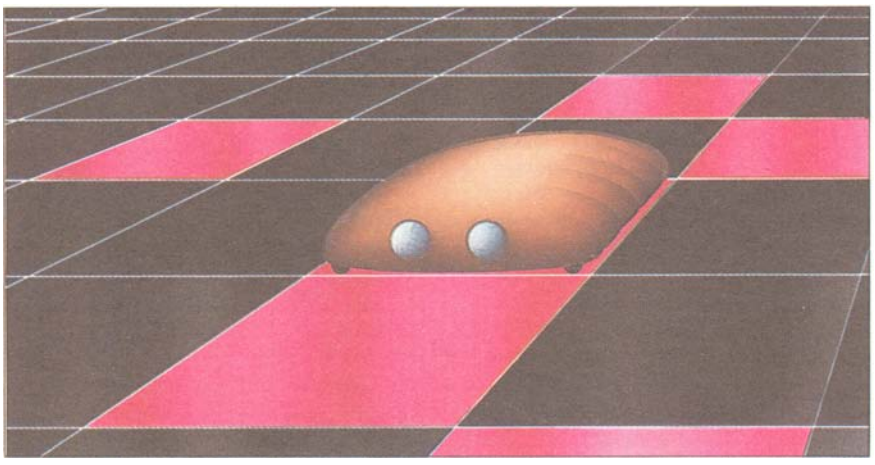
«Термиты... способны создавать сложные узоры на ландшафте, как никакие другие организмы, кроме человека.»

УОЛТЕР ЛИНСЕНМДЙЕР
Насекомые планеты

Тому хотя раз доводил ось видеть термитник, наверное, остались под глубоким впечатлением от сложных систем тоннелей, построенных этими трудолюбивыми, но безмозглыми насекомыми. Парадоксально, но искусственные формы жизни, по сравнению с которыми термиты выглядят гениями, способны создавать не менее удивительные структуры. Возьмем, к примеру, «тьюрмитов». Эти угловатые кибернетические создания наделены самым рудиментарным мозгом. Тем не менее, двигаясь по бесконечной плоскости, которая является средой их обитания, они оставляют следы в виде причудливых узоров, казалось бы отражающих какой-то разумный замысел.

Своим появлением тьюрмиты отчасти обязаны Грегу Тэрку, аспиранту из Университета Северной Каролины в Чепел-Хилле. В течение некоторого времени Тэрк экспериментировал с одной из разновидностей машины Тьюринга, воображаемого устройства, которое долго служило в качестве фундаментальной модели вычислительных процессов. Обычно предполагается, что машина Тьюринга оперирует на бесконечной прямой ленте, поделенной на ячейки. Однако Тэрк изучал машины Тьюринга, работающие со своего рода двумерной лентой - по существу с той самой плоскостью, по которой блуждают тьюрмиты. Двумерную машину Тьюринга превратить в тьюрмита легко и просто: абстрактные правила заменяются несложным образом на нейронную сеть. Такое преобразование является ярким примером важной темы в теории вычислений: часто две, казалось не связанные друг с другом вычислительные схемы оказываются эквивалентными.

Машины Тьюринга были названы в честь английского математика Алана М. Тьюринга, который первым предложил их в качестве способа определения вычислений. По существу машина Тьюринга - это фундаментальная цифровая вычислительная машина. Она может выполнить любое вычисление, доступное современному компьютеру - при условии что ей будет предоставлено достаточно времени.



В каждый момент времени тьюрмит занимает одну клетку

Машину Тьюринга можно представить себе такой, как она показана на рисунке на с.]27: черный ящик, содержащий устройство, которое может считать символ, записанный в ячейке бесконечно длинной ленты, записать новый символ в ту же ячейку и переместить ленту вперед или назад для того, чтобы проанализировать символ, хранящийся в соседней ячейке. Что находится внутри черного ящика? На самом деле это не имеет значения, лишь бы машина придерживалась строго заданной таблицы, в которой указаны действия, которые машина обязана совершить для каждого прочитанного символа и каждого из возможных «СОСТОЯНИЙ», которые меняются с каждым новым циклом действия. Цикл состоит из трех следующих шагов:

1. Прочесть символ, находящийся в данный момент под устройством чтения/ записи.
2. Обратиться к элементу таблицы, определяемому текущим состоянием машины и только что прочитанным символом.
3. Записать символ, определяемый элементом таблицы, продвинуть ленту в указанном направлении и перейти в указанное состояние.

Таким образом, каждый элемент таблицы состоит из трех частей: символа, который нужно записать в текущую ячейку; направления, в котором должна переместиться лента; и состояния, к которому машина переходит по завершении цикла.

Перемещение ленты следует рассматривать в относительном смысле. С таким же успехом можно считать, что лента остается неподвижной, а машина сама перемещается по ней от ячейки к ячейке. На самом деле, если принять идею о том, что движется не лента, а машина Тьюринга, то уже не нужно обладать очень богатым воображением, чтобы представить себе двумерную «ленту», по которой свободно могла бы перемещаться машина.

Независимо от того, одномерна или двумерна лента, поведение машины Тьюринга в конечном итоге определяется ее таблицей. Она в точности эквивалентна программе, управляющей действиями современного цифрового компьютера. В смысле вычислительных возможностей двумерную машину Тьюринга не следует считать более мощной по сравнению с одномерными. Однако двумерная машина обладает, конечно, значительно более интересным репертуаром перемеще-

ний. Траектория следа, показанная на верхнем рисунке на с. 128, была, например, получена с помощью двумерной машины Тьюринга с одним-единственным состоянием. Ее внутренняя таблица имеет следующий вид:

	ЧЕРНЫЙ	КРАСНЫЙ
A	(КР., ВЛЕВО, A)	(ЧЕРН.,ВПРАВО, A)

Единственное состояние машины было обозначено буквойA .

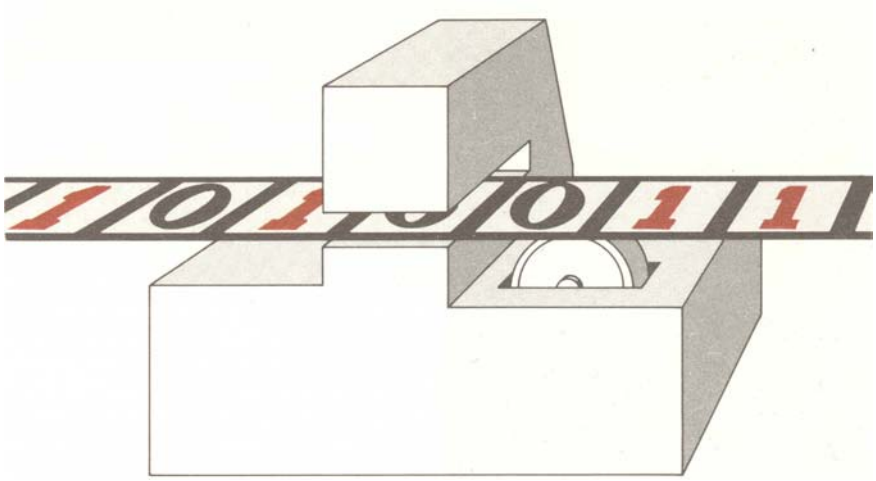
Несколько более сложная двумерная машина Тьюринга, придуманная Тэрком, имеет два состояния, обозначенные как *A* и *B,* и в своем поведении руководствуется следующей в.нутреннеЙ таблицей:

	ЧЕРНЫЙ	ЗЕЛЕНЫЙ
A	(ЗЕЛ., ВЛЕВО, A)	(ЧЕРН., ПРЯМО, *B*)
	(ЗЕЛ., ВПРАВО, A)	(ЗЕЛЕН., ВПРАВО, A)

По словам Тэрка, двумерная машина Тьюринга, запрограммированная с помощью этой таблицы, рисует восхитительные спиральные узоры. Она создает «все более увеличивающиеся разрисованные области, располагающиеся упорядоченным образом вокруг точки старта».

Любой рисунок следа, порожденного двумерной машиной Тьюринга, может быть в точности воссоздан тьюрмитом. Однако поведение тьюрмита не управляется таинственным черным ящиком. Оно контролируется тем, что весьма условно можно было бы назвать мозгом. Тот факт, что мозг термита можно вскрыть и подвергнуть исследованию, делает эти существа особенно интересными.

Если же судить по внешнему виду и характеру поведения, то тьюрмит, конечно, не столь интересен. Тело у него приблизительно квадратное -- подходящее для квадратных ячеек, на которые поделена бесконечная плоскость, среда обитания тьюрмитов. Нижняя поверхность у тьюрмита плоская и оснащена некоторым двигательным аппаратом. (Лично я не знаю, каким образом работает этот аппарат, так как ни разу не переворачивал тьюрмита вверх ногами). Этот аппарат позволяет тьюрмиту вращаться и перемещаться ровно на одну клетку в том направлении, куда он в данный момент ориентирован. По сути дела головы как таковой у тьюрмита нет, она существует лишь условно, чтобы мы могли всегда определить, в какую сторону он ориентирован; «глаза» у него также не функционируют. Когда тьюрмит меняет направление, он просто поворачивается



Типичная машина Тьюринга .

на 900, оставаясь в том же квадрате, прежде чем переместиться в новый.

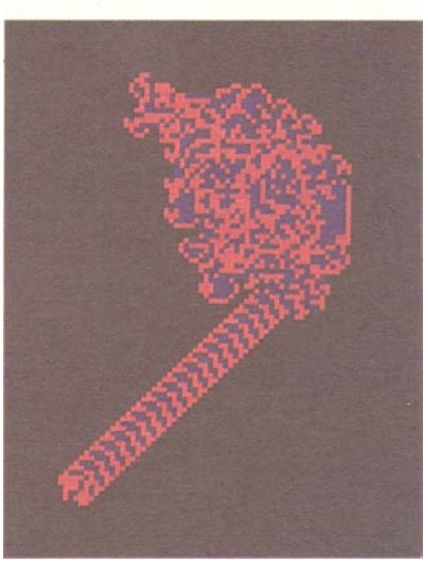
Первоначально все клетки плоскости, включая ту, в которой находится тьюрмит, окрашены в черный цвет. Однако, прежде чем переместиться, тьюрмит может изменить цвет клетки, которую он в данный момент занимает. (Природа красящего органа тьюрмита для нас остается такой же загадочной, как и аппарат, с помощью которого он перемещается.) Тьюрмит, рисующий след, показанный на верхнем рисунке на с. 121:', например, должен уметь окрашивать клетку в один из двух цветов (в данном случае красный или черный). Однако, чтобы воссоздать узор, поКазанный на нижнем рисунке, тьюрмит должен иметь в своем распоряжении более богатую палитру.

Каким образом тьюрмит узнает, когда нужно двигаться или когда изменить окраску квадрата? Этими действиями управляет его «мозг», который состоит из набора «нейродов», являющихся упрощенной моделью нейронов нашего головного мозга. Нейрод принимает сигналы, распространяющиеся по проводящим волокнам и исходящие из сенсоров (расположенных на нижней поверхности тьюрмита) или из других нейродов, и в свою очередь посылает сигналы эффекторам (таким как двигательный аппарат тьюрмита или орган, способный изменять окраску квадрата) или другим нейродам.

Нейрод срабатывает (посылает сигнал по своей выходной линии), если число входных сигналов равно или превышает пороговое значение данного нейрода, которое на схемах обозначается числом, помечающим каждый нейрод. В противном случае он не срабатывает. Поскольку время в мире тьюрмитов меняется дискретными шагами, все сигналы возбуждения И торможения посылаются и принимаются синхронно с этими дискреТНЬ,IМИшагами.

Чтобы проиллюстрировать, каким образом тьюрмит принимает то или иное решение, я проведу вскрытие мозга у двух представителей этого вида (см. левый и средний рисунки на с. 129), каждый из которых производит в точности те же действия, что и двумерная машина Тьюринга с одним состоянием, уже рассмотренная выше. Мозг, изображенный на левом рисунке, имеет два нейрода, не соединенных друг с другом. У каждого нейрода имеется лишь одно входное и одно выходное волокно. Когда цветовой сенсор тьюрмита регистрирует красный цвет, он посылает один сигнал 'левому нейроду , заставляя его СРаботать. Выходное волокно нейрода расщепляется на две линии, одна из которых идет на цветовой эффект ар (последний, получив сигнал, окрашивает клетку, в которой находится ~тьюрмит), а другой -- на двигатель-~ный аппарат (который затем поворачивает тело тьюрмита на 900 вправо и перемещает его на одну клетку в новом направлении движения). С другой стороны, когда цветовой сенсор тьюрмита обнаруживает черную клетку, он посылает сигнал правому нейроду и тот также срабатывает. Выход этого нейрода в свою очередь заставляет тьюрмита перекрасить клетку в красный цвет, прежде чем развернуться и переместиться на соседнюю клетку слева.

Короче говоря, когда тьюрмит выясняет, что находится на красной клетке, он окрашивает ее в черный цвет и перемещается на одну клетку вправо. Если же он занимает черную клетку, то перекрашивает ее в красный цвет, затем поворачивает влево и переходит на одну клетку в одном из направлений.

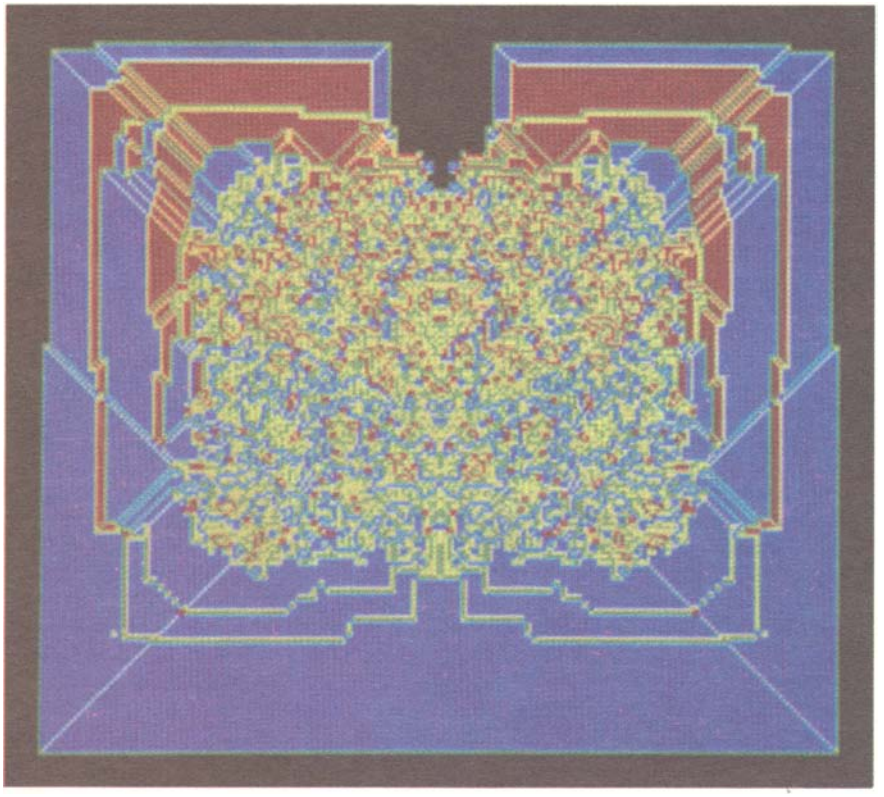


След от машиНы Тьюринга, придуманной Тэрком

Мозг второго тьюрмита имеет более замысловатую конструкцию, однако выполняет в точности ту же работу, что и первый. Здесь оба нейрода имеют порог 2; ни один из них не сработает, пока не получит два входных сигнала на одном и том же временном шаге. Предположим, что первоначальный сигнал привел мозг в действие и один из двух нейродов всегда будет срабатывать на каждом шаге.

Вот такое простое поведение, воплощенное в двух только что рассмотренных нейродных цепях, в результате приводит к созданию довольно сложного изображения (см. рисунок слева): красное облачко из маленьких квадратиков, от которого протягивается прямо в бесконечность замысловатая структура. По какой причине в поведении тьюрмита появляется вдруг такая целеустремленность, после длительных и, казалось бы, бесцельных блужданий? Ответ таится в той закономерности, которую можно пронаблюдать в облачке раскрашенных квадратиков. В какой-то момент времени эта закономерность в сочетании с правилами поведения тьюрмита, основанными на схеме его нейродов, вынуждают это существо войти в повторяющуюся последовательность действий, которая и приводит к построению той сложной структуры, которую мы видим на рисунке. (Интересно, смогут ли наши читатели найти конфигурацию, с которой начинается повторяющаяся последовательность?)

Ну что ж, такова жизнь в мире тьюрмитов. Иногда, казалось бы, бесцельное блуждание превращается в почти абсолютный детерминизм. Конечно, случайность здесь чисто иллюзорная. Все тьюрмиты полностью детерминированы в любой момент времени.



Многоцветный рисунок, созданный тьюрмитом

Тем не менее в мире тьюрмитов встречаются и загадочные явления. Рассмотрим, к примеру, конфигурацию, показанную на нижнем рисунке. Тьюрмит, оставивший этот след, снабжен четырьмя эффекторами, изменяющими цвет клетки, соответственно делая его черным, красным, желтым или зеленым. В своем поведении существо руководствуется следуюшими правилами :

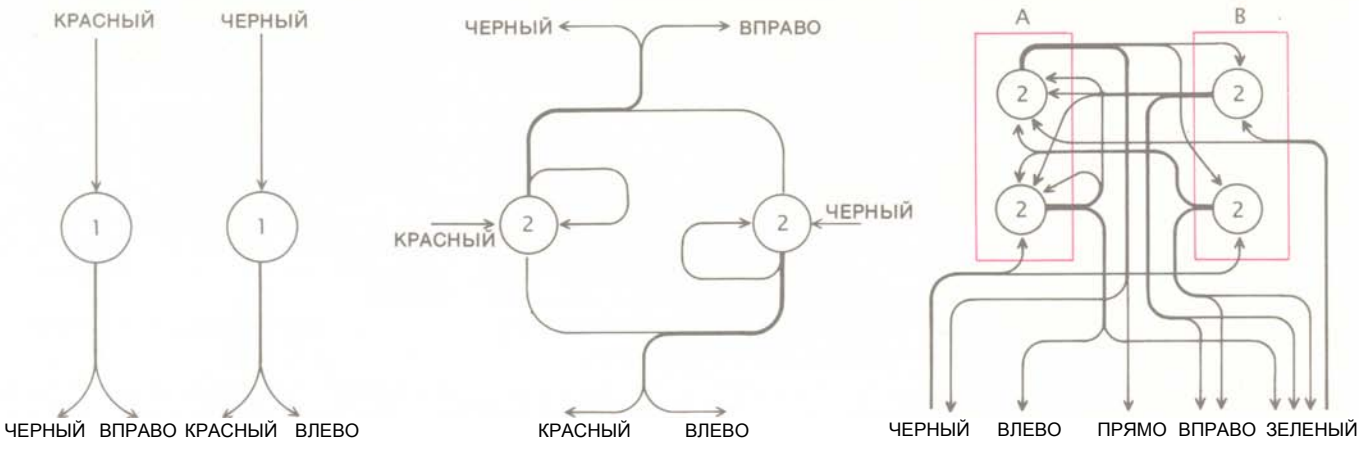
Цвет клетки	Действие
черный	закрасить красным, повернуть вправо
красный	закрасить желтым, повернуть вправо
желтый	закрасить зеленым, повернуть влево
зеленый	закрасить черным, повернуть влево

Мозг этого тьюрмита также очень несложен. Он состоит из четырех нейродов, не соединенных между собой. Каждый из этих четырех нейродов реализует одно из четырех перечисленных правил поведения в той же манере, как это делал простейший мозг первого тьюрмита. Тэрк был озадачен тем фактом, что след, оставляемый этим тьюрмитом, обладает двусторонней симметрией. Возможно, читатели смогут объяснить причину этого явления.

Каким образом можно построить организм тьюрмита на основе той или иной двумерной машины Тьюринга? На самом деле метод построения очень прост. Нужно просто заменить каждый элемент внутренней таблицы машины нейродом с пороговым значением 2, который получал бы входные сигналы от сенсора цвета, соответствующего номеру столбца элемента в таблице, и, возможно, от других нейродов. Выходные линии каждого нейрода должны вести к эффекторам, производящим перемещение и замену цвета, как указано в данном элементе таблицы.

Предположим, что некоторый нейрод соответствует элементу таблицы в столбце, помеченном «красный», и строке, помеченной «В». Согласно схеме преобразования, у нейрода должна быть входная линия, исходящая от сенсора, детектирующего красный цвет. Если элемент таблицы содержит: (черный, *влево,В*), то у нейрода должен быть выход, ведущий к эффектору, который перекрашивает клетку в черный цвет, и другой выход - к эффектору , который позволяет тьюрмиту совершать левые повороты.

Различные состояния данной машины Тьюринга реализуются различ-



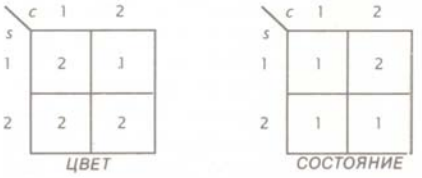
Три мозговых устройства тьюрмитов, два из которых (левое и среднее) *выполняют одну и ту же работу*

ными соединениями между нейродами в мозгу тьюрмита. Поскольку в рассматриваемом примере элемент таблицы требует, чтобы тьюрмит перешел в состояние *B,* то нейрод, представляющий данный табличный элемент, должен иметь выходные линии, ведущие к каждому нейроду, участвующему в представлении строки *B* таблицы.

В данном контексте такая нейронная сеть - это не что иное, как некое аппаратное устройство, воплощающее в себе правила поведения, которые содержатся в таблице. Пример рассмотренного преобразования схематически изображен на правом рисунке вверху. Рисунок показывает, как можно построить мозг тьюрмита, моделирующего поведение «спиральной» двумерной машины Тьюринга, придуманной Тэрком.

Забавно наблюдать за тем, как тьюрмит (или двумерная машина Тьюринга) блуждает ло клеточной плоскости. Однако, чтобы стать свидетелем этого зрелища, читатель должен написать программу , моделирующую движения тьюрмита. Каким образом можно перейти от таблицы к программе? К счастью, это почти так же просто, как построить структуру мозга тьюрмита. Программа, которую я назову TURMITE, пользуется в своей работе таблицей машины Тьюринга, представленной в виде трех отдельных массивов: *color* (цвет), *motion* (движение) и *state* (состояние). Каждый массив индексируется двумя переменными,С is. Переменнаяс индексирует цвет текущего квадрата, а *s* - текущее состояние машины Тьюринга (или эквивалентного тьюрмита). Поскольку этим переменным должны присваиваться в качестве значений целые числа, цвета и состояния, используемые в данной модели, должны быть пронумерованы. (Элементы массивов также должны быть целыми числами.)

Например, черный и зеленый цвета могут быть присвоены переменной с в виде чисел 1 и 2 соответственно. Аналогичным образом, состояния *A* и *B* могут быть обозначены соответственно числами 1 и 2 в качестве значений переменной s. В нашем случае при моделировании спирального тьюрмита нам потребуются следующие массивы:



Направления движения также должны быть закодированы числами. Поэтому «вперед», «назад», «влево» и «вправо» будут соответственно обозначаться числами 1, 2, 3, 4 в качестве значений элементов массива *motion.*

Главная цель программы TURMITE заключается в том, чтобы закрашивать маленькие квадратики (может быть, даже отдельные пикселы) на экране компьютера в соответствии с действиями тьюрмита. Программа хранит цвета высвечиваемых ею квадратиков в двумерном массиве под именем *pattern* (картинка). Первоначально высвечивается лишь один квадратик - расположенный в самом центре экрана.

Значение с в каждый данный момент определяется элементом мас*сивapattern,* соответствующим текущим координатам тьюрмита на экране, скажем *i* и *j.* Располагая известными значениями с и s, программа просто обращается к элементам *color (c, s), motion (c,* s) и *state (c, s).*

Программа изменяет цвет, закодированный в элементе *pattern (i, j),* а затем изменяет значение *i* или *j* в зависимости от значения, хранящегося в *motion (c, s).* Здесь программа должна преобразовать относительное перемещение, закодированное в *motion,* в абсолютное перемещение, проанализировав значение другой переменной *dir,* содержащей направление последнего перемещения: вверх, вниз, влево или вправо. Заключительный шаг в основном цикле действий программы TURMITE состоит просто в том, чтобы заменить значение s числом, содержащимся в *state (c, s).* Остальное можно оставить воображению и изобретательности тех читателей, которым нравится писать свои собственные программы.

Конструируя мозг тьюрмита или моделируя его поведение на компьютере, интересно, наверное, будет поразмышлять также и о том, что тьюрмиты, способные выполнить любое вычисление, производимое машиной Тьюринга, смогут вполне успешно работать в качестве компьютеров. Если, как некоторые утверждают, человеческий мозг представляет собой не что иное, как своеобразный цифровой компьютер, то кое-какие тьюрмиты могли бы быть и не глупее нас с вами - если не умнее!

МОДЕЛИРОВАНИЕ эволюции, тема нашеи статьи в июльском номере, вызвало многочисленные отклики читателей. Несколько сот читателей пожелали приобрести подробное описание алгоритма, на основе которого они могли бы написать свою собственную версию программы . В конце концов не часто можно увидеть, как за какой-нибудь час или полчаса совершается эволюция простейших и бактерий.

Майкл Палмайтер, школьный учитель из Калифорнии, заслуживает

пальмовой ветви за свое изобретение. ~Очевидно, это была очень своевременная идея. Несомненно, духом этой эпохи - эпохи моделируемой эволюции - прониклись несколько читателей, которые независимо разработали свои программы, оказавшиеся во многом схожими с «Моделью эволюции» ПалмаЙтера.

Так, М. Штипановиц из Нэшвилла (шт. Теннесси), выиграл ряд конкурсов с программой, моделирующей овальных букашек, бороздящих двумерное пространство в поисках случайно распределенного корма. В его программе окружающая среда создает механическое сопротивление движущимся букашкам. Это сопротивление может быть сведено к минимуму путем эволюционного развития обтекаемых форм тела.

К. Охейвер также представил программу моделирования эволюции на конкурс любительских программ. В отличие от букашек Палмайтера организмы в программе Охейвера неподвижны (скорее подобны водорослям, нежели простейшим); они постоянно поглощают пищу, растут и сами служат пищей другим организмам.

П. Х. Дил из Мориарти (шт. Нью-Мексико) создал довольно сложную эволюционную программу и распространяет ее в учебных заведениях. Генный набор его созданий включает 13 генов, управляющих такими характеристиками существа, как способность питаться органическими веществами, поглощать энергию и двигаться (хотя и несколько вяло).

Среди читателей, сумевших запустить BUGS, мою упрощенную версию программы Палмайтера, пользуясь лишь весьма поверхностным описанием, приведенным в статье, назовем Л. Глейвина из Бернаби (Британская Колумбия), К. Шеллера из Бельвю (шт. Небраска), Дж. Хенри из Де-Кальба (шт. Иллинойс) и А. Бенке из Бостона (шт. Виргиния). Глейвин, которого раздражало количество энергии, иногда затрачиваемой букашками вблизи границ экрана, наделил своих простейших способностью отскакивать от границ экрана. Шеллер явно поощрял ген, вносящий наибольший вклад в успешную тактику поиска пищи. Столкнувшись с тем, как трудно отличить более развитых букашек от их эволюционно отсталых собратьев, Хенри окрашивал их в зависимости от проявляемой склонности оставаться на том же месте. Бенке наделил своих созданий аналогичным свойством, заставляя букашку менять окраску, когда она меняет направление движения.

И наконец, постскриптум к нашей июньской статье с ее шутливым сюжетом о производстве золота. В этой статье я несколько раз процитировал свою переписку с некоей сомнительной личностью по имени Арло Липоф. Липоф, в частности, утверждал, что уже несколько сбил рыночную стоимость золота, применив теорему Банаха - Тарского на практике для производства золота из ничего. Недавно я получил сердитое послание от организации «Международный совет по вопросам золота» со штаб-квартирой в Нью-Йорке. В письме говорится, что я несу полную ответственность за «неразбериху» и «крах цивилизации», которые могут стать следствием разглашения секретов Липофа. И далее: «В течение долгих лет наша организация принимала все меры к тому, чтобы парадокс Банаха - Тарского не стал известен широкой общественности ... Мы всегда знали, что апокалиптическая возможность производства большего количества золота из меньшего имела бы роковые последствия для международного баланса в мировой финансовой системе».

Наука и общество

Доходы на отходах

"Г""ОРОД Кент в штате Вашингтон .1 может похвастаться незабываемым пейзажем: на горизонте высится гора Рейнир, а перед ней пышные леса - это два отвала для токсичных отходов и две свалки, собирающие твердые отходы из Сиэтла и других близлежащих городов. В последние годы компании по переработке отходов и консультанты заработали миллионы долларов на расчистке ядовитого месива в Кенте, сжигая метан, образующийся при разложении содержимого свалок, и перевозя некоторые виды отходов на переработку в другие места. Несмотря на возрастающую потребность в удалении отходов, город Кент вряд ли может позволить себе и дальше расширять территорию свалок и увеличивать число мусоросжигательных печей.

Ситуация в Кенте выявила и возможности, и трудности в' области борьбы с отходами. В США ежегодно выбрасывается на свалки 250 млн. т промышленных и бытовых твердых отходов. Как указывает Марк Сулам, сотрудник компании Kidder, Пибоди, на этой базе возникла целая отрасль промышленности с общим капиталом 20 млрд. долл. По некоторым прогнозам, ежегодный рост количества отходов составит 15-20%. Вредные отходы образуют самостоятельную отрасль промышленности с капиталом 4 млрд. долл., который, как ожидается, ежегодно будет увеличиваться \на 20-30%. (Радиоактивные отходы - это еще одна проблема и другая сфера бизнеса.) Но вряд ли какой-либо город, большой или малый, стремится стать участником этого бума. Свалки вокруг Кента, пишет Дин Рэдфорд, редактор газеты «УаПеу Daily News», «были построены в 50-х и 60-х годах, когда мы были сугубо сельским районом и не имели политических целей. Теперь мы понимаем, что нельзя больше терпеть это безобразие в самом центре нашего поселения».

Что же делать с отходами? Множество компаний пытается найти альтернативы. Как отмечает Вишну Суорап, сотрудник компании Prudential-Bache Securities, если лет пять назад было всего четыре или пять корпораций, занимавшихся переработкой отходов, то теперь их более сорока. Крупные компании расширяют масштабы своей деятельности, скупая мелкие фирмы по переработке отходов. Предприимчивые дельцы изучают возможности капиталовложений в мероприятия по защите окружающей среды; в прошлом году они увеличили свои вклады на 29 млн. долл. в предприятия по борьбе с отходами, контролю загрязнения окружающеЙ среды и использованию вторичного сырья; по данным консультантов компании Venture Economics, 5507Øтой суммы вложено в организацию новых компаний.

~Как указывает Джозеф Доррикот, генеральный директор отделения Resource Energy Systems компании Westinghouse, есть четыре способа решения проблемы твердых отходов: сокращение количества отходов в процессе производства, вторичное использование образующихся отходов, сжигание отходов с целью получения энергии и захоронение. К сожалению, усилия промышленных корпораций (и городских властей) по снижению количества отходов пока еще недостаточны. Агентство по охране окружающей среды (EPA) признает, что начало широкой пропаганде сокращения отходов было положено лишь несколько лет назад. (EPA)планирует развернуть повсеместную борьбу за сокращение отходов. С этой целью агентство намеревается публиковать специальные издания, в которых бу-